

# 《化工原理》知识点整理

来自 Xzonn 的小站

更新于 2020-11-19 19:11 · 渲染于 2021-01-10 20:28



## 目录

<b>1 流体流动</b>	<b>1</b>	1.3.2 稳态流动与非稳态流动	3
1.1 流体的物理性质	1	1.3.3 连续性方程	3
1.1.1 流体的密度	1	1.3.4 伯努利方程	3
1.1.2 流体的黏度	1	1.3.5 伯努利方程的应用	4
1.2 流体静力学基本方程	2	<b>2 流体输送机械</b>	<b>4</b>
1.2.1 流体的静压强	2	2.1 离心泵	4
1.2.2 流体静力学方程	2	2.1.1 离心泵的操作原理、构造与类型	4
1.2.3 静力学方程的应用	2	2.1.2 离心泵的基本方程式	5
1.3 流体流动的基本方程	3	2.1.3 离心泵的主要性能参数与特性曲线	6
1.3.1 流量与流速	3	2.1.4 离心泵性能的改变	6
		2.1.5 离心泵的气蚀现象与允许吸上高度	6

## 1 流体流动

### 1.1 流体的物理性质

#### 1.1.1 流体的密度

- 单位体积的流体所具有的质量,  $\rho = \frac{\Delta m}{\Delta V}$ 。影响因素:  $\rho = f(T, p)$ 。
- 液体: 不可压缩性流体,  $\rho$  仅与温度  $T$  有关。
- 理想气体在标况下的密度:  $\rho_0 = \frac{M}{22.4 \text{ L/mol}}$ 。
- 混合物的密度:
  - 液体:  $\frac{1}{\rho_m} = \frac{x_{w1}}{\rho_1} + \frac{x_{w2}}{\rho_2} + \dots + \frac{x_{wn}}{\rho_n}$ 。
  - 固体:  $\rho_m = \rho_1 x_{v1} + \rho_2 x_{v2} + \dots + \rho_n x_{vn}$ 。
- 与密度相关的物理量:
  - 比容: 单位质量的流体所具有的体积,  $v = \frac{1}{\rho}$ 。
  - 比重 (相对密度): 某物质的密度与 4 °C 下的水的密度的比值,  $d = \frac{\rho}{\rho_{4^\circ\text{C water}}}$ , 其中  $\rho_{4^\circ\text{C water}} = 1000 \text{ kg/m}^3$ 。

#### 1.1.2 流体的黏度

- 流体有一种抗拒内在的向前运动的特性, 称为粘度。
- 对于一定的流体, 内摩擦力  $F$  与两流体层的速度差  $\Delta u$  成正比, 与两层之间的垂直距离  $\Delta y$  成反比, 与两

层之间的接触面积  $S$  成正比，即：  $F = \mu \frac{\Delta u}{\Delta y} S = \tau S$ 。其中，  $\mu$  为粘滞系数或动力粘度简称粘度，  $\tau$  为单位面积上的内摩擦力。

- 由上式  $\tau = \mu \frac{\Delta u}{\Delta y}$ ，速度梯度越大，剪应力越大。
- 凡遵循牛顿粘性定律的流体称为牛顿型流体，否则为非牛顿型流体。所有气体和大多数液体均属于牛顿型流体；而某些高分子溶液、油漆、血液等则属于非牛顿型流体。
- 流体的运动粘度  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ 。
- 常压气体混合物的粘度：  $\mu_m = \frac{\sum y_i \mu_i M_i^{1/2}}{\sum y_i M_i^{1/2}}$ 。
- 非缔合液体混合物的粘度：  $\lg \mu_m = \sum x_i \lg \mu_i$ 。
- 理想流体：粘度为零的流体。

## 1.2 流体静力学基本方程

### 1.2.1 流体的静压强

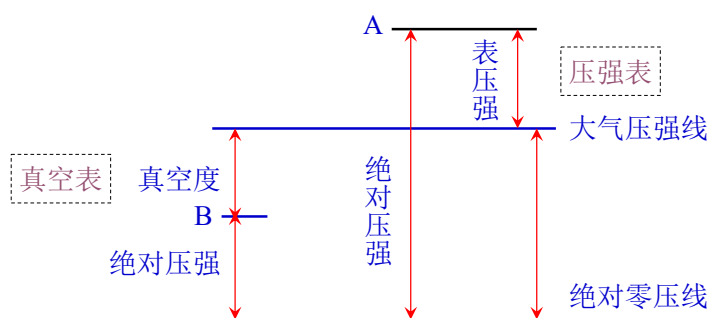


图 1 压强的表示方法

- 定义：流体的单位表面积上所受的力，称为流体的静压强，简称压强。  $p = \frac{P}{A}$ 。
- 表示方法：
  - 绝对压强（绝压）：流体体系的真实压强。
  - 表压强（表压）：压力计上读取的压强。表压强 = 绝对压强 - 大气压强。
  - 真空度：真空表上读取的压强。真空度 = 大气压强 - 绝对压强 = -表压。

### 1.2.2 流体静力学方程

- 方程：  $p = p_0 + \rho gh$ 。
- 液体内部压强随  $p_0$  和  $h$  改变；对同一液体处于同一水平面上各点的压强相等；液面上所受的压强能以同样大小传递到液体内部的任一点；仅适用于静止的单一流体；压强差的大小可利用一定高度的液体柱来表示；方程是以不可压缩流体推导出来的，对于可压缩性的气体，只适用于压强变化不大的情况。

### 1.2.3 静力学方程的应用

- 压强与压强差的测量：U 管压差计、倾斜液柱压差计、微差压差计。
- 液位的测量。

- 液封高度的计算。

## 1.3 流体流动的基本方程

### 1.3.1 流量与流速

- 流量：单位时间内流过管道任一截面的流体量。若用体积来计量称为体积流量  $V_s$ ，若用质量来计量称为质量流量  $w_s$ ， $w_s = V_s \rho$ 。
- 流速：单位时间内流体在流动方向上流过的距离。 $u = \frac{V_s}{A}$ 。

### 1.3.2 稳态流动与非稳态流动

- 稳态流动：流动系统中流体的流速、压强、密度等有关物理量仅随位置而改变，而不随时间而改变
- 非稳态流动：上述物理量不仅随位置而且随时间变化的流动。

### 1.3.3 连续性方程

- 在稳定流动系统中，对直径不同的管段做物料衡算，对于连续稳定系统输入 = 输出，即  $w_{s1} = w_{s2}$ 。
- 推广到任意截面，有  $w_s = uA\rho = \text{const}$ 。
- 若流体为不可压缩流体，则有  $V_s = uA = \text{const}$ 。对于圆形管道， $\frac{u_1}{u_2} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2$ 。

### 1.3.4 伯努利方程

- 流动系统的总能量衡算：
  - 流体本身具有的能量：
    - 内能：物质内部能量的总和称为内能。单位质量流体的内能以  $U$  表示
    - 位能：流体因处于重力场内而具有的能量。质量为  $m$ 、高度为  $Z$  的流体具有的位能为  $mgZ$ 。
    - 动能：流体以一定的流速流动而具有的能量。质量为  $m$ 、流速为  $u$  的流体所具有的动能为  $\frac{1}{2}mu^2$ 。
    - 静压能：通过某截面的流体具有的用于克服压力功的能量。流体通过截面的静压能为  $pV$ ，单位质量流体所具有的静压能  $p\frac{V}{m} = pv$ 。
    - 单位流体本身所具有的总能量为： $U + gZ + \frac{1}{2}u^2 + pv$ ，单位为 J/kg。
  - 系统与外界交换的能量：
    - 热：单位质量流体通过划定体积的过程中所吸的热为  $Q_e$ ，吸热为正，放热为负。
    - 外功：单位质量通过划定体积的过程中接受的功为  $W_e$ ，接受外功为正，向外做功为负。
    - 流体本身所具有能量和热、功就是流动系统的总能量。
  - 总能量衡算： $\Delta U + g\Delta z + \Delta u^2/2 + \Delta(pv) = Q_e + W_e$ 。
- 流体系统的机械能恒算式： $g\Delta Z + \Delta u^2/2 + \int_{p_1}^{p_2} vdp = W_e - \sum h_f$ ，其中  $\sum h_f$  为流体克服流动阻力而损失的能量。
- 伯努利方程：当流体不可压缩时有  $g\Delta Z + \Delta u^2/2 + \frac{\Delta p}{\rho} = W_e - \sum h_f$ ；

$$\text{或 } gZ_1 + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + W_e = gZ_2 + \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + \sum h_f.$$

- 伯努利方程的讨论:
  - 理想流体在管内做稳定流动, 没有外功加入时, 任意截面上单位质量流体的总机械能即动能、位能、静压能之和为一常数 (总机械能), 用  $E$  表示。对于实际流体, 上游截面处的总机械能大于下游截面处的总机械能。
  - 当体系无外功且处于静止状态时有  $gZ_1 + \frac{p_1}{\rho} = gZ_2 + \frac{p_2}{\rho}$ , 流体的静力平衡是流体流动状态的一个特例。
  - 以单位重量流体为衡算基准, 有  $Z_1 + \frac{u_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + H_e = Z_2 + \frac{u_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + H_f$ ,  $Z$ 、 $\frac{u^2}{2g}$ 、 $\frac{p}{\rho g}$  和  $H_f$  分别被称为位压头、动压头、静压头和压头损失,  $H_e$  为输送设备对流体所提供的有效压头。
  - 对于可压缩流体的流动, 当所取系统两截面之间的绝对压强变化小于原来压强的 20%, 即  $\frac{p_1 - p_2}{p_1} < 0.2$  时, 仍可使用伯努利方程。式中流体密度应以两截面之间流体的平均密度  $\rho_m$  代替。
  - 对于非稳态流动系统的任意瞬间, 伯努利方程仍然成立。

### 1.3.5 伯努利方程的应用

- 作图并确定衡算范围: 根据题意画出流动系统的示意图, 并指明流体的流动方向, 定出上下截面, 以明确流动系统的衡标范围。
- 截面的截取: 两截面都应与流动方向垂直, 并且两截面的流体必须是连续的, 所求得未知量应在两截面或两截面之间, 截面的有关物理量  $Z$ 、 $u$ 、 $p$  等除了所求的物理量之外, 都必须是已知的或者可以通过其它关系式计算出来。
- 基准水平面的选取: 基准水平面的位置可以任意选取, 但必须与地面平行, 为了计算方便, 通常取基准水平面通过衡算范围的两个截面中的任意一个截面。如衡算范围为水平管道, 则基准水平面通过管道中心线,  $\Delta Z = 0$ 。
- 单位必须一致: 在应用伯努利方程之前, 应把有关的物理量换算成一致的单位, 然后进行计算。两截面的压强除要求单位一致外, 还要求表示方法一致。

## 2 流体输送机械

- 流体输送机械: 向流体做功以提高流体机械能的装置。
- 输送液体的机械通称为泵, 输送气体的机械按不同的工况分别称为通风机、鼓风机、压缩机和真空泵。

### 2.1 离心泵

#### 2.1.1 离心泵的操作原理、构造与类型

- 构造:
  - 由若干个弯曲的叶片组成的叶轮置于具有蜗壳通道的泵壳之内。
  - 叶轮紧固于泵轴上, 泵轴与电机相连, 可由电机带动旋转。
- 工作过程:
  - 开泵前, 先在泵内灌满要输送的液体。

- 开泵后，泵轴带动叶轮一起高速旋转产生离心力。液体在此作用下，从叶轮中心被抛向叶轮外周，压力增高，并以很高的速度（15-25 m/s）流入泵壳。
- 泵内的液体被抛出后，叶轮的中心形成了真空，在负压作用下液体经吸入管路进入泵内。
- 气缚：离心泵启动时，如果泵壳内存在空气，低压不足以造成吸上液体所需要的真空度，离心泵就无法工作。
- 叶轮：
  - 作用：将电动机的机械能传给液体。
  - 分类：按照结构——闭式叶轮、开式叶轮、半闭式叶轮。按照吸液方式——单吸式、双吸式。
  - 闭式叶轮有前后盖板，适合干净流体，效率高。开式叶轮无前后盖板，适合带有固体颗粒的液体悬浮物，效率较低。半闭式叶轮只有后盖板。
- 泵壳：汇集液体，作为导出液体的通道；使液体的能量发生转换，一部分动能转变为静压能。
  - 为了减少液体直接进入蜗壳时的碰撞，在叶轮与泵壳之间有时还装有一个固定不动的带有叶片的圆盘，称为导叶轮。使能量损失减小，动能向静压能的转换更为有效。

## 2.1.2 离心泵的基本方程式

- 基本假设：
  - 泵叶轮的叶片数目为无限多个。
  - 输送的是理想液体，流动中无流动阻力。
- 推导：
  - 在高速旋转的叶轮当中，液体质点的运动包括：液体随叶轮旋转，经叶轮流道向外流动。
  - 液体与叶轮一起旋转的速度  $u_1$ 、 $u_2$  方向与所处圆周的切线方向一致，大小为  $u = \frac{2\pi r n}{60}$ 。
  - 液体沿叶片表面运动的速度  $\omega_1$ 、 $\omega_2$ ，方向为液体质点所处叶片的切线方向，大小与液体的流量、流道的形状等有关。
  - 两个速度的合成速度  $c_1$ 、 $c_2$  是液体质点在点 1 或点 2 处相对于静止的壳体的速度，称为绝对速度。
  - 单位重量理想液体通过无数叶片的旋转获得的能量称作理论压头，用  $H_{T\infty}$  表示。 $H_{T\infty} = H_p + H_c = \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2g}$ ，其中  $H_p$  和  $H_c$  分别是静压头和动压头的增加。
  - 静压头增加主要来源于离心力做功和能量转换，整理得  $H_{T\infty} = \frac{u_2 c_2 \cos \alpha_2 - u_1 c_1 \cos \alpha_1}{g}$ 。设计中一般  $\alpha_1 = 90^\circ$ ，即  $\cos \alpha_1 = 0$ 。
- 讨论：
  - 离心泵基本方程式： $H_{T\infty} = \frac{(r_2 \omega)^2}{g} - \frac{\omega \cot \beta_2}{2\pi b_2 g} Q_T$ 。
  - 对于某个离心泵，转速  $\omega$  一定时，理论压头与理论流量之间为线性关系。
  - 根据流动角  $\beta_2$  的大小，可将叶片形状分为后弯（ $\beta < 90^\circ$ ）、径向（ $\beta = 90^\circ$ ）和前弯（ $\beta > 90^\circ$ ）叶片 3 种。前弯叶片理论压头最大，但实际上多采用后弯叶片。
- 实际压头和实际流量：由于存在能量损失和流量损失，实际压头低于理论压头，实际流量低于理论流量。

### 2.1.3 离心泵的主要性能参数与特性曲线

- 性能参数:
  - 流量  $Q$ : 离心泵在单位时间里排到管路系统的液体体积。单位  $\text{m}^3/\text{h}$ 。
  - 压头  $H$ : 泵对单位重量的液体所提供的有效能量, 又称为泵的扬程。单位  $\text{m}$ 。理想条件  $H = \Delta Z + \frac{p_2 - p_1}{\rho g}$ 。
  - 效率  $\eta$ : 容积损失、水力损失、机械损失三者总和。
  - 轴功率  $N$ : 电机输入离心泵的功率。有效功率  $N_e$ : 排送到管道的液体从叶轮获得的功率。  $N_e = \eta N$ 。
- 离心泵的特性曲线:  $H$ 、 $\eta$ 、 $N$  与  $Q$  的关系, 随转速而变。
  - $H-Q$  曲线: 压头随流量增大而下降。
  - $N-Q$  曲线: 轴功率随流量增大而上升。
  - $\eta-Q$  曲线: 效率随流量增大先上升到最大值, 随后下降。
  - 离心泵在一定转速下有最高效率点, 在最高效率点对应的流量和压头下工作最为经济, 此点的  $Q$ 、 $H$ 、 $N$  值称为最佳工况参数。

### 2.1.4 离心泵性能的改变

- 液体物性的影响:
  - 密度: 离心泵的轴功率与液体密度有关。
  - 黏度: 液体粘度小于 20cSt (厘沲) 时 (如汽油、柴油、煤油) 可以不用修正。
- 转速的影响: 近似为  $\frac{Q'}{Q} = \frac{n'}{n}$ 、 $\frac{H'}{H} = \left(\frac{n'}{n}\right)^2$ 、 $\frac{N'}{N} = \left(\frac{n'}{n}\right)^3$ 。
- 叶轮直径的影响: 同一系列不同尺寸的泵叶轮形状相似, 即有  $\frac{Q'}{Q} = \frac{D_2'}{D_2}$ 、 $\frac{H'}{H} = \left(\frac{D_2'}{D_2}\right)^2$ 、 $\frac{N'}{N} = \left(\frac{D_2'}{D_2}\right)^3$ 。

### 2.1.5 离心泵的气蚀现象与允许吸上高度

- 气蚀现象: 叶片入口处的压强小于或低于输送温度下液体的饱和蒸气压。
- 离心泵的允许吸上高度  $H_g$ : 又称为允许安装高度, 指泵的吸入口与吸入贮槽液面间可允许达到的最大垂直距离。